유사색 모집단을 이용한 물체의 분광 반사율 추정

이철희[†] · 서봉우[††] · 안석출[†††]

요 약

다대역(multi-band) 카메라 시스템으로 물체의 분광 반사율을 추정하여 피사체의 고유한 색자극을 기록하기 위한 연구가 활발하다. 그러나 다대역 카메라 시스템은 대역 수에 따라 추가적인 색필터가 필요하며 중복촬영으로 인하여 시스템의 복잡성이 증가하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 3대역 RGB카메라를 이용하여 분광 반사율의 추정 오차를 개선하는 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 화소 단위로 반사광의 모집단을 갱신하여 각 입력색에 대해 적응적인 주성분 벡터를 구하였으며 이를 이용하여 해당 화소의 분광 반사율 추정시 오차를 줄였다. 제안된 분광 반사율 추정 방법의 유용성을 평가하기 위하여 제안된 방법과 3대역 주성분 분석(principal component analysis) 방법 및 5대역 위너 추정(Wiener estimation) 방법에 대하여 각각 Macbeth ColorChecker에 대한 분광 반사율 추정 실험을 하였다. 결과, 제안한 방법은 색차 및 분광 반사율 평균자승오차가 기존의 3대역 주성분 분석 방법보다 적었으며 5대역 카메라를 이용한 분광 반사율 추정 방법과 근사하거나, 개선되었음을 확인하였다.

Estimation of Surface Spectral Reflectance using A Population with Similar Colors

Cheol-Hee Lee[†], Bong-Woo Seo[††] and Suk-Chul Ahn[†††]

ABSTRACT

The studies to estimate the surface spectral reflectance of an object have received widespread attention using the multi-spectral camera system. However, the multi-spectral camera system requires the additional color filter according to increment of the channel and system complexity is increased by multiple capture. Thus, this paper proposes an algorithm to reduce the estimation error of surface spectral reflectance with the conventional 3-band RGB camera. In the proposed method, adaptive principal components for each pixel are calculated by renewing the population of surface reflectances and the adaptive principal components can reduce estimation error of surface spectral reflectance of current pixel. To evaluate performance of the proposed estimation method, 3-band principal component analysis, 5-band wiener estimation method, and the proposed method are compared in the estimation experiment with the Macbeth ColorChecker. As a result, the proposed method showed a lower mean square error between the estimated and the measured spectra compared to the conventional 3-band principal component analysis method and represented a similar or advanced estimation performance compared to the 5-band wiener method.

1. 서 론

물체의 분광반사율은 물체의 색자극을 표시하는 중요한 요소이다. 따라서 물체의 분광 반사율을 추정함으로써 피사체의 고유한 색자극을 기록하는 연구가 매우 활발하다. 즉 다수 개의 색필터를 부착한 다대역 카메라 시스템을 구성하여 피사체를 촬영한 뒤 위너 추정[1,2] 및 주성분 분석[3-8] 방법으로 물체의 고유한 분광 반사율을 추정함으로써 분광분포에 기초한 색재현을 가능하게 하고 있다.

현재 보고된 바에 의하면 자연색의 경우 5매 이상

[†] 정회원, 경운대학교 컴퓨터공학과 전임강사
[††] 부경대학교 대학원 인쇄정보공학과 박사과정
[†††] 부경대학교 인쇄정보공학과 교수

의 색필터를 이용할 경우 인간 시각이 구별해 낼 수 있는 색차 범위 이내로 물체의 분광 반사율 추정이 가능하며 피부색과 같은 특수색의 경우에는 3개의 색필터를 이용하여 근소한 색차 범위 내에서 물체의 분광반사율 추정이 가능하다고 보고 되고 있다. 그러나 5대역 영상 획득 시스템의 경우 추가적으로 색필터를 부착해야 하며 중복 촬영을 하여야 하므로 기존의 RGB카메라 시스템으로 구현이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 기존의 RGB 카메라와 같은 3대역 영상획득 시스템을 이용하여 자연색의 분광반사율을 추정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 주성분 분석과정에서 각 자연색에 대한 주성분 벡터의 누적 기여율을 높이기 위해 입력색에 대하여 모집단을 갱신하였다. 즉 기존의 방법에서는 분광 반사율의 모집단 전체에 대하여 주성분 벡터를 구하고 각 입력색에 대해서는 주성분에 해당하는 고유값만을 구하여 이의 선형조합으로 분광 반사율을 추정하였다. 그러나 제안된 방법에서는 각 입력색에 대하여 색차를 기준으로 유사색 모집단을 구성하고 각 모집단에 대한 주성분 분석을 통해 주성분 벡터(기저함수)를 구하여 실제 분광 반사율의 정보를 복원할 수 있는 척도를 나타내는 누적 기여율을 높임으로써 추정된 분광 반사율의 추정 오차를 줄일 수 있다.

제안된 방법의 성능 평가를 위하여 색재현 평가시 많이 사용되는 Macbeth ColorChecker에 대한 분광반사율 추정 실험을 하였다. 3대역 주성분 분석 및 위너 추정을 이용한 5대역 추정 방법 그리고 제안된 3대역 주성분 분석 방법과 비교 실험을 하였으며, 각 방법에 대하여 분광 반사율의 평균 오차 및 누적 기여율 비교를 통하여 제안된 방법의 유용성을 평가하였다.

2. 분광 반사율 추정 방법

2.1 주성분 분석에 의한 분광 반사율 추정 방법

다대역 카메라를 이용하여 물체의 분광 반사율을 추정할 경우 카메라의 센서응답 V_i 는 주변 광원의 분광분포 $E(\lambda)$, 물체 고유의 분광 반사율 $O(\lambda)$, 카메라의 분광 감도 $S(\lambda)$, m매의 광학 필터의 분광 투과율 $f_i(\lambda)$으로 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i=\int_1^n E(\lambda)O(\lambda)f_i(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (i=1,2,\ldots,m) \tag{1}$$

위 식을 행렬식으로 표시하면

$$\begin{aligned} \mathrm{V}_i &= \mathrm{f}_i\mathrm{ESO} \\ &= \mathrm{F}_i^t\mathrm{O} \quad (i=1,2,\ldots,m) \end{aligned} \tag{2}$$

이때 물체 고유의 분광 반사율 O는 식 (3)과 같이 몇 개의 주성분을 이용하여 매우 작은 오차 범위 내에서 표현될 수 있다는 것이 많은 연구에서 보고되고 있다[3-8].

$$\mathrm{O}=\sum_{i=1}^{m}\alpha_i\mathrm{u}_i+\overline{\mathrm{O}} \tag{3}$$

위 식에서 u_i 는 사용된 분광 반사율 모집단의 주성분 벡터이며, α_i는 각 주성분 벡터에 대한 전개 계수이고 $\overline{\mathrm{O}}$은 분광 반사율 모집단의 평균 분광 반사율을 나타낸다. 따라서 식 (3)을 이용하여 다대역 카메라의 응답 특성을 표현하면

$$\begin{bmatrix}\mathrm{V}_1\\ \mathrm{V}_2\\ \vdots\\ \mathrm{V}_m\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathrm{F}_1^t\\ \mathrm{F}_2^t\\ \vdots\\ \mathrm{F}_m^t\end{bmatrix}\left([\mathrm{u}_1\ \mathrm{u}_2 \ldots \mathrm{u}_m]\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \vdots\\ \alpha_m\end{bmatrix}+\overline{\mathrm{O}}\right) \tag{4}$$

과 같다. 그러므로 각 주성분 벡터에 대한 전개 계수 α_1, α_2, $\cdots$, α_m는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \vdots\\ \alpha_m\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathrm{F}_1^t\mathrm{u}_1 & \mathrm{F}_1^t\mathrm{u}_2 & \ldots & \mathrm{F}_1^t\mathrm{u}_m\\ \mathrm{F}_2^t\mathrm{u}_1 & \mathrm{F}_2^t\mathrm{u}_2 & \ldots & \mathrm{F}_2^t\mathrm{u}_m\\ \vdots & & \ddots & \\ \mathrm{F}_m^t\mathrm{u}_1 & \mathrm{F}_m^t\mathrm{u}_2 & \ldots & \mathrm{F}_m^t\mathrm{u}_m\end{bmatrix}^{-1}\left(\begin{bmatrix}\mathrm{V}_1\\ \mathrm{V}_2\\ \vdots\\ \mathrm{V}_m\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\mathrm{V}_{1\bar{o}}\\ \mathrm{V}_{2\bar{o}}\\ \vdots\\ \mathrm{V}_{m\bar{o}}\end{bmatrix}\right) \tag{5}$$

위 식에서

$$\begin{bmatrix}\mathrm{V}_{1\bar{o}}\\ \mathrm{V}_{2\bar{o}}\\ \vdots\\ \mathrm{V}_{m\bar{o}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathrm{F}_1^t\\ \mathrm{F}_2^t\\ \vdots\\ \mathrm{F}_m^t\end{bmatrix}\overline{\mathrm{O}}. \tag{6}$$

일반적인 Bayer구조의 칼라 CCD카메라의 경우 3개의 센서 응답을 갖는다. 그러므로 위 식에서 광학필터의 개수를 나타내는 m은 3이다. 따라서 고차원의 센서 응답을 갖는 다대역 카메라를 만들기 위해서는 부가적인 광학필터를 이용한 중복 촬영이 필요하며 이는 별도의 하드웨어 구성을 요구한다.

2.2 위너 추정에 의한 분광 반사율 추정 방법

다대역 카메라의 출력으로부터 물체의 고유한 분광 반사율을 구하는 또 다른 방법으로 위너추정법을 이용한 계산법이 널리 사용되고 있다[1,2]. 식 (2)에서 m개의 센서 응답 V_i로 부터 n차원의 물체의 분광 반사율 O를 얻기 위해서는 아래 식과 같이

$$O = F^{-1}V \tag{7}$$

벡터 F의 역행렬을 이용하여 간단히 구할 수 있다. 이때 벡터 F는 다음 식과 같다.

$$F = fES \tag{8}$$

그러나 일반적으로 다대역 카메라의 센서 응답의 수는 물체의 분광 분포에 비해 차원이 낮으므로 다음 식과 같은 추정 행렬 G가 필요하다.

$$\hat{O} = GV \tag{9}$$

따라서 물체의 분광 반사율 O와 추정한 피사체의 분광 반사율 $\hat{O}$ 사이의 평균 자승 오차를 최소화하기 위한 추정 행렬 G는 아래 식과 같이 실측한 분광 반사율과 추정한 분광 반사율 사이의 MSE(mean square error)를 최소화하는 행렬로 정의된다.

$$\begin{aligned} MSE &= Trace(\langle (O-GV)^t(O-GV) \rangle) \\ &= Trace(R_{oo} - R_{ov}G^t - GR_{ov}^t + GR_{vv}G^t) \\ &= Trace(R_{oo} - 2R_{ov}G^t + GR_{vv}G^t) \end{aligned} \tag{10}$$

위 식에서 R_{oo}, R_{ov}, R_{vv}는 상관행렬로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{oo} = \langle OO^t \rangle,\ R_{ov} = \langle OV^t \rangle,\ R_{vv} = \langle VV^t \rangle \tag{11}$$

식 (10)에서 행렬 G와 R_{ov}는 모두 $n \times m$차원 행렬이다. 각 행렬을 행벡터로 분해하면 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} g_1^t \\ g_2^t \\ \vdots \\ g_n^t \end{bmatrix}, \quad R_{ov} = \begin{bmatrix} r_1^t \\ r_2^t \\ \vdots \\ r_n^t \end{bmatrix} \tag{12}$$

$n \times m$행렬의 n행 n열의 요소는

$$[R_{ov}G^t]_{nn} = r_n^t g_n,\ [GR_{vv}G^t]_{nn} = g_n^t R_{vv} g_n \tag{13}$$

따라서 MSE는 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} MSE &= \sum_{n=1}^{N} S_n, \\ S_n &= [R_{oo}]_{nn} - 2[R_{ov}G^t]_{nn} + [GR_{vv}G^t]_{nn} \\ &= [R_{oo}]_{nn} - 2\, r_n^t g_n^t + g_n^t R_{vv} g_n \end{aligned} \tag{14}$$

S_n은 행렬 G의 제 n행의 요소만을 포함하기 때문에, 각 행에 대하여 S_n을 최소화하는 g_n을 선택할 경우 MSE가 최소가 된다. 그러므로 S_n이 최소화되기 위해서는 g_n이 다음 식과 같아야 하며

$$R_{vv}\, g_n = r_n \quad (n = 1, 2, 3, \cdots, n) \tag{15}$$

따라서 추정 행렬 G는 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$G = R_{ov} R_{vv}^{-1} \tag{16}$$

또한 다대역 카메라에서 카메라의 센서 응답 V에 노이즈 성분 벡터 N이 포함되어진 경우 식 (17)과 같이 표현한다.

$$V = FO + N \tag{17}$$

노이즈를 첨가한 물체의 분광 반사율을 구하기 위한 R_{ov}와 R_{vv}는 다음과 같다.

$$R_{ov} = R_{oo} F^t + R_{vn} \tag{18}$$

$$R_{vv} = FR_{oo}F^t + FR_{on} + R_{on}^t F^t + R_{nn} \tag{19}$$

따라서 벡터 V로부터 추정되는 물체의 분광 반사율 $\hat{O}$를 구하기 위한 추정행렬 G는

$$G = R_{oo}F^t(FR_{oo}F^t + R_{nn})^{-1} \tag{20}$$

과 같다. 여기서 R_{oo}는 벡터 O의 자기 상관 행렬이고, R_{nn}은 열잡음을 나타내며 그 발생확률이 가우스 분포에 따르고, 동시에 무상관이라면 자기 상관 행렬인 R_{nn}은 식 (21)으로 표현된다.

$$R_{nn} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & 0 \\ & \sigma_2^2 & \\ & & \cdots & \\ 0 & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \tag{21}$$

이때 σ_i^2, $(i = 1, 2, \ldots, m)$는 각 대역에서 노이즈의 분산을 나타낸다.

본 연구에서는 위너 추정법을 이용한 분광 반사율 추정의 비교실험을 위해 1개의 CCD카메라, 5매의 광학필터를 이용한 5대역 분광 반사율 추정 시스템을 구성하였다.

3. 제안된 유사색 모집단을 이용한 분광 반사율 추정 방법

가시 광선의 영역에서 물체의 분광 반사율 곡선은 변화가 급격하지 않으며 부드러운 곡선의 형태를 나타낸다. 따라서 Cohen, Maloney, Pakkienen 등 다양

한 연구자들에 의해 몇 개의 주성분의 조합으로 이루어지는 선형모델을 이용해 물체의 분광 반사율을 추정할 수 있다는 것이 보고되고 있다.[3-5] 이때 주성분 혹은 기저함수는 색현시(color appearance) 시스템의 각 칼라칩(color chips)에 대한 측정값으로 얻은 분광 데이터를 이용하여 구한다. 대표적인 색현시 시스템으로는 먼셀 및 Natural Color System(NCS) 등이 있으며 이러한 시스템들은 인간의 색인지 특성인 색상(hue), 명도(value), 채도(chroma) 혹은 블랙니스(blackness), 화이트니스(whiteness), 크로마틱니스(chromaticness)에 기초하여 인지적으로 균일하게 분포된 칼라칩들을 포함하고 있다[10]. 그러나 실제 먼셀 및 NCS의 칼라칩들의 분광반사율은 시스템 제작 과정에서 사용된 염료의 분광 분포이며 일반적인 물체의 분광 반사율과는 차이가 있다. 그러나 전술한 바와 같이 다양한 칼라칩을 이용한 통계적인 분석 방법을 통해 일반적인 물체색의 분광반사율을 근사화 할 수 있다는 것이 연구자의 실험을 통해 증명되고 있다. 칼라칩의 통계적 분석 방법으로는 주로 주성분 분석 방법이 사용된다. 이러한 주성분 분석 과정에서 추정 성능은 식 (3)과 같이 사용되는 주성분 벡터의 수에 의해 결정된다. 즉 주성분 벡터의 수가 많을 수록 추정 오차는 줄어든다. 주성분 벡터의 수에 따른 실제 분광 반사율의 추정성 평가는 누적 기여율을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_m = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{m} \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i} \tag{22}$$

위 식에서 n은 이산함수인 분광 반사율을 구성하는 표본의 크기이며 m은 주성분의 수를 타낸다. 본 연구에서는 주성분 벡터를 얻기 위해 먼셀 시스템을 이용하여 380-780nm까지 1nm간격으로 1485개의 분광 반사율 측정값을 얻고 이로부터 각 분광 반사율 측정치에 대하여 400-700nm까지 10nm간격으로 표본을 생성하였다. 표 1은 실험에 사용된 칼라칩의 주성분의 수에 따른 전개계수 α의 누적 기여율을 나타낸다.

표 1에서 보는 바와 같이 3개의 주성분을 사용할 경우 누적 기여율은 98.70%이므로 이론적으로는 카메라 응답으로부터 실제 분광 반사율의 98.70% 범위까지 추정할 수 있다. 그러므로 보다 정밀한 분광 반사율 추정을 위해서는 기존의 RGB카메라 보다 더 많은 센서응답을 갖는 다대역 카메라를 사용하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 기존의 3대역 카메라를 사용하면서 계산된 주성분의 전개계수에 대한 누적 기저율을 높이기 위해, 각 입력색에 대하여 유사색 모집단을 구성한 후 이 모집단을 이용하여 분광 반사율을 추정하였다. 제안된 추정 방법은 그림 1과 같다.

즉 전체 먼셀 분광반사율 모집단에 대하여 주성분을 구하는 것이 아니라 1485개의 먼셀 모집단으로부터 유사색 모집단을 얻고 이로부터 주성분을 구하였다. 이때 유사색 모집단은 1485개를 갖는 먼셀 분광반사율 모집단의 부분 집합으로써 분광 반사율을 구하고자 하는 물체의 카메라 응답, 즉 RGB출력과 유사한 색을 포함하는 분광 반사율 집합을 나타낸다.

이러한 유사색 모집단을 구성하기 위하여 1485개의 먼셀 칼라칩의 분광 분포와 3대역 영상획득 시스템에 사용되는 광원의 분광 분포를 이용하여 그림 1과 같이 반사광 모집단을 구성한다. 다음 이 반사광 분광 분포로부터 삼자극치 값을 얻고 다시 CIELAB 값으로 변환하여 반사광 모집단의 크기와 동일한 CIELAB값을 얻는다. 다음 카메라 출력 $R_c\,G_c\,B_c$에 대하여 식 (23)을 이용한 선형변환을 통해 삼자극치로 변환한 후 색차 비교를 통해 가장 작은 색차를 나타내는 분광 분포를 먼셀 분광 반사율 모집단으로부터 찾는다.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.588 & 0.179 & 0.183 \\ 0.290 & 0.606 & 0.105 \\ 0.000 & 0.068 & 1.021 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} \tag{23}$$

그림 2는 Macbeth ColorChecker의 15번 색표본에 대한 실제 측정된 분광 반사율과 유사색으로 찾은 먼셀 모집단의 분광 반사율을 나타낸다.

유사색으로 찾아진 분광 반사율 모집단의 반사광

표 1. 1485개의 먼셀 색시료의 주성분의 수에 따른 누적 기여율

주성분의 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
누적기여율[%]	76.11	92.96	98.70	99.35	99.72	99.84	99.91	99.94	99.97	97.98	99.99
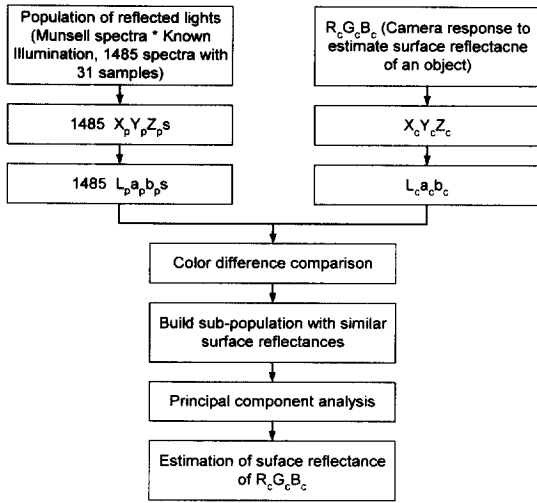
그림 1. 유사색 모집단을 이용한 분광 반사율 추정방법의 흐름도

으로부터 해당하는 분광 반사율을 추출하여 유사색 모집단을 구성한 후 이 모집단에 대하여 주성분 분석을 통해 3개의 주성분을 얻는다. 그림 2 (c)는 유사색 모집단에 대한 주성분 분석법을 통해 얻은 주성분 함수를 나타낸다. 따라서 물체의 분광 반사율은 식 (5)와 같이 카메라 응답의 삼자극치 $X_C Y_C Z_C$를 이용하여 3개 주성분 함수에 대한 전개 계수를 구하여 추정할 수 있다.

4. 실험 및 고찰

제안된 유사색 모집단을 이용한 분광 반사율 추정 방법의 성능을 평가하기 위하여 Macbeth Color Checker에 포함된 24개의 색표본에 대한 분광 반사율 추정실험을 하였다. 그림 3은 CIELAB공간에서 24개 색표본의 분포를 나타낸다.

그림 3에서 보는 바와 같이 Macbeth Color Checker의 경우 24개의 색표본이 무채색 및 자연색의 전 영역에 고르게 분포되어 있어 색재현성의 평가에 널리 사용된다.

분광 반사율 추정 방법으로는 3대역 주성분 분석법, 5대역 위너 추정법 그리고 제안된 유사색 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법이 사용되었으며 Macbeth ColorChecker의 색표본에 대하여 측정된 분광 반사율와 각각의 방법으로 추정된 분광 반사율 사이에 RMSE(root mean square error)를 비교하였다. 또한 주성분 분석 방법에서 실제 분광 반사율의 복원 능력을 나타내는 누적기여율을 계산하여 제안된 유사색 모집단을 이용한 분광반사율 추정법의 타당성을 증명하였다.

기존의 3대역 주성분 분석을 위해서는 1485개의 먼셀 칼라칩을 모두 이용하여 전술한 주성분 분석 방법으로 주성분을 계산하였다. 그림 4는 1485개 먼셀 칼라칩으로 구한 3개 주성분의 분광 반사율을 나타낸다.

5대역 위너 추정법을 위해서는 카메라의 분광 감도 및 광학필터의 분광 감도 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 카메라의 분광 감도를 구하기 위하여 단색광 발생기를 이용하여 10nm간격으로 카메라에 주사한 다음 파장별 상대적인 분광 감도를 구하였다. 그림 5는 CCD의 분광 감도, 적외선차단필터, 렌즈의 분광 투과율을 합한 Toshiba IK-C41MK CCD카메라의 총합적인 분광 감도를 나타낸다.

광학필터로는 상용화된 Fuji사 photo film 필터와
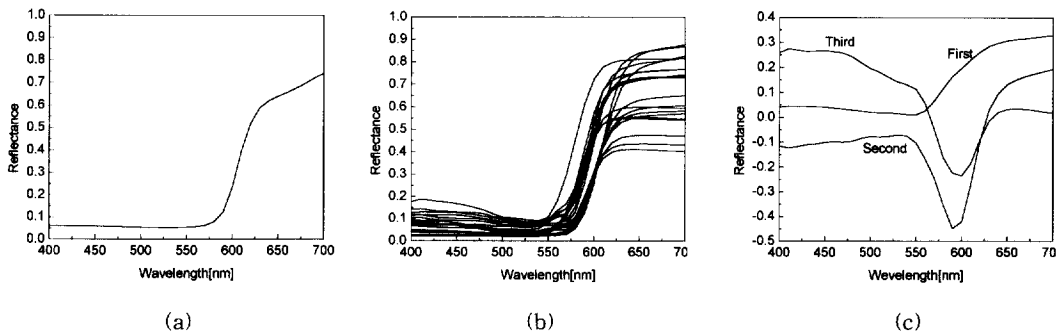
그림 2. 측정된 분광 반사율 및 유사색 분광 반사율 모집단과 모집단으로 부터 얻은 주성분 함수 (a) Macbeth ColorChecker 15번 칼라칩의 측정된 분광반사율 (b) 동일 칼라칩의 유사색 분광 반사율 모집단 (c) 유사색 모집단의 주성분 함수
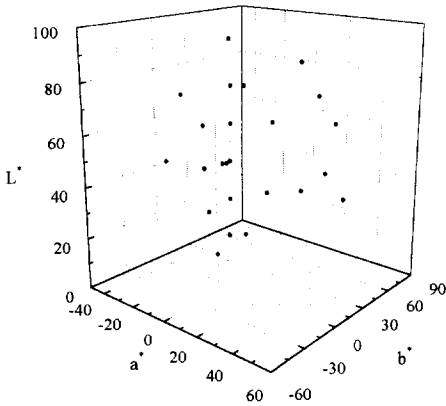
그림 3. CIELAB공간에서 Macbeth ColorChecker의 색표본 분포
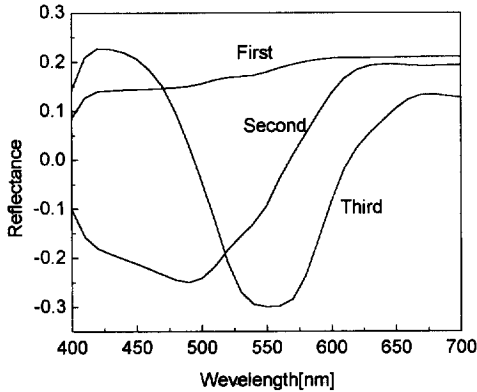
그림 4. 1485개 먼셀 칼라칩의 주성분 함수
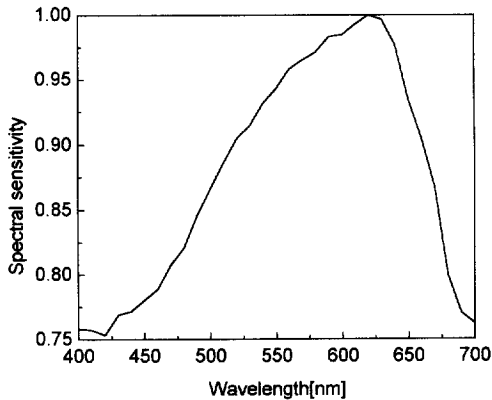
그림 5. Toshiba IK-C41MK CCD카메라의 분광 감도

Kodak사의 wrattin 색분해용 필터 24중 5매의 최적 필터 조합을 선정하였다. 그림 6은 분광 분포 추정에 사용된 광학필터의 분광 투과율을 나타낸다.
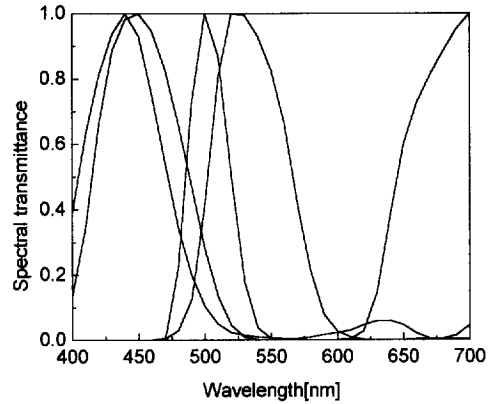
그림 6. 5대역 위너 추정을 위한 광학필터의 분광 투과율

제안된 유사색 모집단을 이용한 분광 반사율 추정을 위해서 Macbeth ColorChecker의 각 색표본에 대하여 유사색 모집단을 구성하였다. 이때 색차를 기준으로 유사색 모집단을 구했다. 그림 7은 색차를 달리하며 유사색 모집단을 구성하고 이 모집단의 주성분을 이용해 Macbacth ColorChecker의 분광 반사율 구하였을 때 24개의 측정된 분광 반사율과 추정된 분광 반사율 사이의 RMSE의 평균을 나타낸다. 이때 RMSE는 아래 식과 같다.

$$\mathrm{RMSE} = \frac{1}{31} \sum_{\lambda=400}^{700} \sqrt{(O(\lambda) - \overline{O}(\lambda))^2} \tag{24}$$
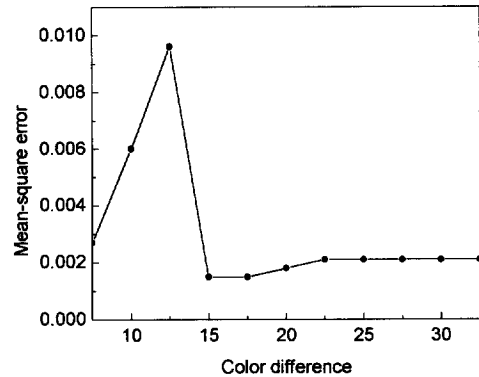
그림 7. 색차에 따른 유사색 모집단의 분광 반사율 추정오차

그림에서 보는 바와 같이 분광 반사율의 평균 추정오차는 유사색 모집단을 구성할 때 정의되는 색차의 크기에 따라 가변적이며 모집단의 크기가 너무 작을 경우 계산된 주성분이 실제의 분광 반사율을 잘 추정하지 못하며 또한 유사색 모집단의 크기가 일정한 범위를 넘을 경우, 전체 모집단에 대하여 3개

의 주성분을 이용해 구한 경우와 평균 추정오차가 근접해짐을 알 수 있다. 실험에서 색차를 달리하며 평균 추정오차를 구한 결과 15~20사이의 평균 색차를 이용해 유사색 모집단을 구했을 때 가장 적은 추정오차를 나타냈다. 그림 8은 언급한 세 가지의 방법으로 Macbeth ColorChecker의 분광 반사율을 추정한 결과이다. 그림 8(a),(b),(c)는 추정된 분광반사율 및 측정한 분광 반사율을 나타내며 그림 8(d),(e),(f)는 추정오차를 나타낸다. 표 1은 24개의 분광 반사율에 대한 추정 오차의 평균을 나타낸다.

그림 8 및 표 2에서 보는 바와 같이 제안된 방법은 분광 반사율 추정할 경우 평균 추정오차 및 최대 추정오차가 모두 가장 작음을 확인할 수 있다. 그림 9는 제안된 방법으로 추정시 가장 큰 추정오차를 나타내는 Macbeth ColorChecker의 15번 색표본에 대한 추정 결과이다. 가장 큰 오차를 나타내는 경우에도 비교적 원래의 분광 반사율을 잘 나타내며 특히 분광 반사율의 급격한 변화를 잘 추정함을 알 수 있다.
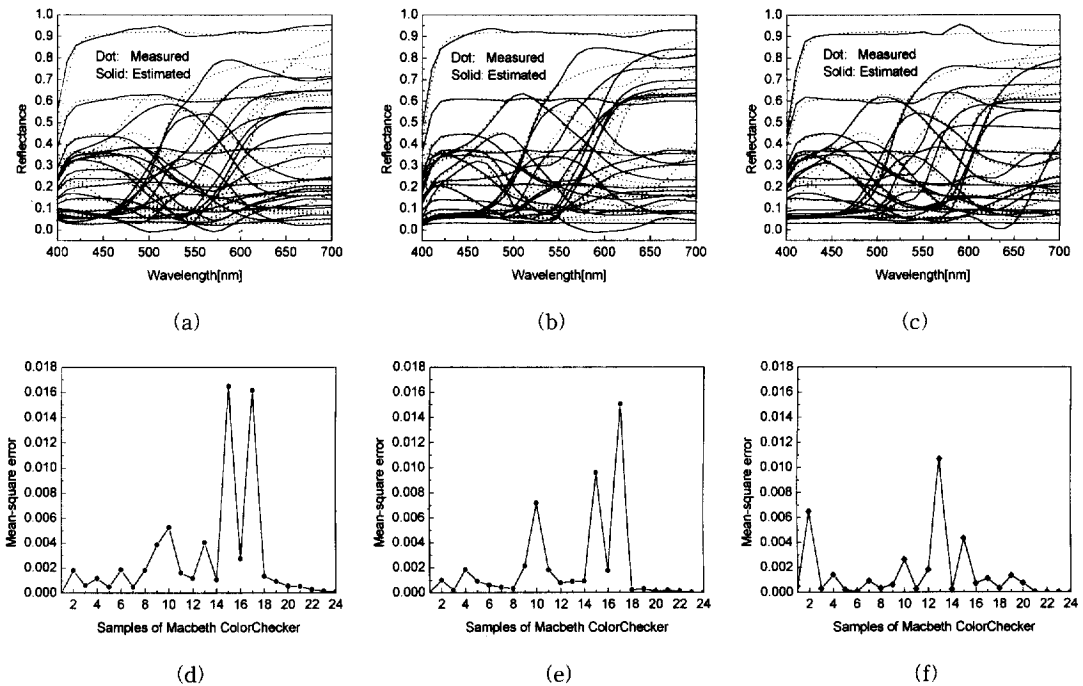
그림 8. 측색된 분광반사율과 추정된 분광 반사율 및 두 분광 반사율간의 RMSE (a) 3대역 주성분 분석 (b) 5대역 위너 추정법 (c) 제안된 유사색 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법 (d) 3대역 주성분 분석법에 의한 분광 반사율 추정오차 (e) 5대역 위너 추정법에 의한 분광 반사율 추정오차 (f) 제안된 유사색 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법의 분광 반사율 추정오차

표 2. Macbeth ColorChecker의 평균 분광반사율 추정오차

추정방법	3대역 주성분 분석법	5대역 위너 추정법	제안된 유사색 모집단을 이용한 3대역 주성분 분석법
Macbeth ColorChecker의 분광 반사율 평균추정오차	0.00269	0.00193	0.00146
Macbeth ColorChecker의 분광 반사율 추정시 최대추정오차	0.01648	0.01505	0.01068
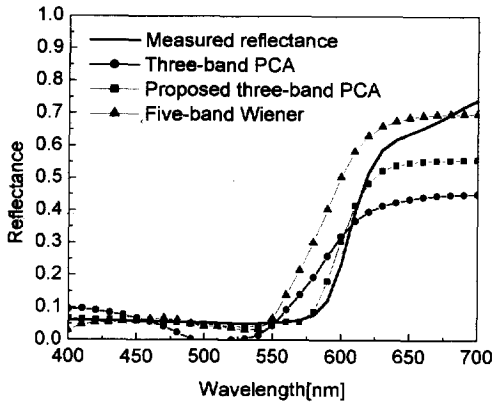
그림 9. Macbeth ColorChecker 15번에 대한 추정 결과

그림 10. 3대역 주성분 분석과 제안된 방법사이의 누적 기여율 비교

제안된 유사색 모집단을 이용한 분광 반사율 추정 방법의 추정오차가 줄어드는 것은 주성분함수를 각 입력색에 대해 최적화함으로써 적응적인 분광반사율 추정이 가능하게 되었다. 이것은 누적 기여율의 계산을 통해 증명될 수 있다. 표 3은 24개 Macbeth 색표본에 대한 각 주성분의 평균 누적 기여율을 나타낸다.

표 3 및 그림 10의 결과에서 알 수 있듯이 제안된 방법은 기존의 3대역 주성분 분석 방법에 비해 누적 기여율 측면에서 원래의 분광반사율 추정시 복원성이 향상되었으며 3개의 주성분 만으로 평균 98.772% 정도로 실측된 분광 반사율을 복원 가능함을 확인하였다

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 3대역 RGB카메라를 이용하여 영상을 획득한 뒤 화소 단위로 유사색 모집단을 생성함으로써 각 입력색에 적응적인 분광 반사율 추정이 가능한 분광 반사율 추정방법을 제안하였다. 유사색 모집단 생성을 위해서 1485개의 먼셀 색표본의 분광 반사율 표본을 이용하여 입력색에 대한 색차 비교를 통해 각 색에 대한 유사색 모집단을 구성하였으며 이로부터 입력색에 대한 주성분 함수를 작성하였다. 따라서 기존의 먼셀 색표본 전체에 대한 주성분 함수에 비해 향상된 분광 반사율 추정이 가능하였다.

제안된 분광 반사율 추정 방법의 유용성을 평가하기 위하여 제안된 방법과 3대역 주성분 분석방법 및 5대역 위너 추정 방법에 대하여 각각 Macbeth ColorChecker에 대한 분광 반사율 추정 실험을 하였다. 결과, 제안한 방법은 색차 및 분광 반사율 평균자승오차가 기존의 3대역 주성분 분석법 및 5대역 위너 추정법 보다 적었으며 주성분 분석법 적용시 실제 분광반사율의 복원성을 결정하는 누적 기여율 측면에서도 향상된 성능을 확인할 수 있었다.

그러나 각 유사색 모집단을 결정하는 과정에서 각 모집단의 수가 너무 적을 경우 특정색에서 추정 오차가 크게 증가하는 문제점이 있다. 따라서 향후 연구에서는 추정 오차를 최소화하면서 안정된 크기의 모집단을 구성하기 위한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] H. Haneishi, T. Hasegawa, N. Tsumura, and Y. Miyake, "Design of color filters for recording artworks," *IS&T 50th Annual conference*, pp. 369-372, 1997.

[2] Y. Miyake and Y. Yokoyama, "Obtaining and reproduction of accurate color images based

표 3. 제안된 방법의 분광 반사율 추정시 주성분의 수에 따른 누적 기여율의 평균

주성분의 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9
평균누적 기여율[%]	79.937	94.797	98.772	99.625	99.883	99.959	99.985	99.994	99.997

on human perception," *Proc. SPIE 3300*, pp. 190-197, 1998.

[3] J. Cohen, "Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips," *Psychon. Sci.*, 1, pp. 369-370, 1964.

[4] L. T. Maloney, "Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 3, no. 10, pp. 1673-1683, Oct. 1986.

[5] T. Jaaskelainen, J. Parkkinen, and S. Toyooka, "Vector subspace model for color representation," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 7, no. 4, pp. 725-730, Apr. 1990.

[6] M. J. Vrhel and H. J. Trussell, "Color Correction using Principal Components," *Color Res. Appl.*, vol. 17, no. 5, pp. 328-338, Oct. 1992.

[7] S. Usui, S. Nakauchi, and M. Nakano, "Reconstruction of Munsell color space by a five-layer neural network," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 9, no. 4, pp. 516-520, Apr. 1992.

[8] Reiner Lenz and Mats Osterberg, "Unsupervised filtering of color spectra," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 7, pp. 1315-1324, July 1996.

[9] M. J. Vrhel, R. Gershon, and L. S. Iwan, "Measurement and analysis of object reflectance spectra," *Res. Appl.*, vol.19, no.4, Aug. 1994.

[10] M. D. Fairchild, *Color appearance model*, Messachusetts, Addison Wesley Longman, Inc., pp. 113-123, 1997.

이 철 희

1995년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1997년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
2000년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
2000년~현재 경운대학교 컴퓨터공학과 전임강사
관심분야 : 칼라프린팅, 색재현, 영상처리 등

서 봉 우

1996년 부경대학교 인쇄정보공학과 졸업(공학사)
1998년 부경대학교 대학원 인쇄정보공학과 졸업(공학석사)
2000년~현재 부경대학교 대학원 인쇄정보공학과 박사과정
관심분야 : 칼라프린팅, 색재현, 색채학

안 석 출

1976년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1978년 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
1987년 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
1980년 (주)금성ALPS
1983년 미국 N.C.S.U. Visiting scholar
1986년~현재 부경대학교 인쇄정보공학과 교수
관심분야 : 색재현, 칼라운영, 하프토닝